中国生态农业学报 2017 年 4 月 第 25 卷 第 4 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Apr. 2017, 25(4): 530−541

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160931

姚兴成, 曲恬甜, 常文静, 尹俊, 李永进, 孙振中, 曾辉. 基于 MODIS 数据和植被特征估算草地生物量[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(4): 530−541

Yao X C, Qu T T, Chang W J, Yin J, Li Y J, Sun Z Z, Zeng H. Estimation of grassland biomass using MODIS data and plant community characteristics[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(4): 530−541

基于 MODIS 数据和植被特征估算草地生物量*

姚兴成[1], 曲恬甜[1], 常文静[1], 尹　俊[2**], 李永进[2], 孙振中[1**], 曾　辉[1,3]

(1. 北京大学深圳研究生院城市规划与设计学院　深圳　518055; 2. 云南省草原监督管理站　昆明　650224; 3. 北京大学城市与环境学院　北京　100871)

摘　要: 准确估算草地生物量, 对全球气候变化背景下的陆地生态系统碳循环研究具有重要意义。过去几十年, 草地生物量估算研究大多集中在北方, 而南方草地具有类型繁多和分布零散等特征, 对其生物量进行评估的报道较少。本文以云南省为例, 应用 2012—2014 年草地生物量野外调查资料和同期 MODIS 遥感数据, 建立草地地上生物量(AGB)遥感估算模型; 再引入草地植被群落特征(高度和盖度)信息对统计模型进行优化, 并进行生物量空间反演。结果表明: 优化后模型的估算精度由原来的 35.0%提升为 43.7%; 反演得到云南省 3 年年均 AGB 的总量介于 1 026.86 万~1 408.54 万 t, 平均为 1 221.11 万 t; 从空间分布上看, 云南省草地 AGB 密度总体上呈现西部高东部低、南部高北部低的格局。本研究首次将遥感植被指数数据与实测植被群落特征参数结合, 使估算精度比传统的纯粹光学遥感模拟方法显著提升 24.9%, 但精确估算大面积的草地 AGB, 需要进一步探索如何将激光雷达数据或遥感立体影像中提取的植被特征信息应用于草地 AGB 估算研究。

关键词: 云南省; MODIS 数据; 地上生物量; 植被特征信息; 空间反演
中图分类号: P962　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1671-3990(2017)04-0530-12

Estimation of grassland biomass using MODIS data and plant community characteristics*

YAO Xingcheng[1], QU Tiantian[1], CHANG Wenjing[1], YIN Jun[2**], LI Yongjin[2], SUN Zhenzhong[1**], ZENG Hui[1,3]

(1. Department of Urban Planning and Design, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, China; 2. Yunnan Grassland Supervision and Management Station, Kunming 650224, China; 3. Department of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: In the context of global climate change, the accurate estimation of grassland biomass is critical for terrestrial carbon cycling research. In China, most studies in this area have focused on grasslands in North China over the past decades. Only a few studies have estimated grassland biomass in South China, mainly due to difficulties in spatial complexity of plant species in the region. Therefore, it is necessary to develop a model for the estimation of grassland biomass in South China in order to analyze the spatial distribution of this vegetation type. In this study, we first developed a model for the estimation of

* 国家自然科学基金项目(41401096)和云南草地生态红线研究课题资助
** 通讯作者: 尹俊, 主要从事草原监督管理工作, E-mail: yinjun252@sohu.com; 孙振中, 主要从事生态系统生态学研究, E-mail: sunzz@pkusz.edu.cn
姚兴成, 主要从事遥感与地理信息系统及生态规划研究。E-mail: 1401213729@sz.pku.edu.cn
收稿日期: 2016-10-20　接受日期: 2016-12-29

* This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41401096) and the Research on Ecological Baseline of Yunnan Grassland.
** Corresponding authors: YIN Jun, E-mail: yinjun252@sohu.com; SUN Zhenzhong, E-mail: sunzz@pkusz.edu.cn
Received Oct. 20, 2016; accepted Dec. 29, 2016

aboveground grassland biomass (AGB) in Yunnan Province using field sample and NDVI (normalized difference vegetation index) data (2012–2014), derived from MODIS sensor. The derived grassland characteristics (height and coverage) were then inputted into the model to improve the estimation accuracy. With the improved model, we used remote sensing and GIS platforms to map the spatial pattern of AGB in Yunnan Province. Finally, we carried out statistical analysis of AGB of grassland in a district in Yunnan Province and calculated the average density of AGB in multiple types of grassland. The results indicated that: 1) the model for the estimation of AGB of grassland was improved by the use of field data on plant community. Thus the goodness-of-fit (R^2) of the model increased by 0.289 and the estimation accuracy of the model also increased (35.0%–43.7%) significantly. 2) During 2012–2014, annual total AGB in the study area was 1.03×10^7–1.41×10^7 tons, with an average value of 1.22×10^7 tons that accounted for 4.1% of total AGB in China. The results suggested that the area of grasslands in South China is not negligible. The density of AGB of grassland in Yunnan was highest in the eastern and southern regions of the province. 3) The density of AGB of grassland in the districts of Yunnan was 1 130.12–2 116.03 kg·hm^{-2}. Grasslands with high AGB densities were in southern and southwestern areas of the province, including Xishuangbanna, Dehong and Puer. Grasslands with low densities were in northwestern and eastern areas of the province, including Diqing and Qujing. Moreover, AGB density of mutiple grassland types had a clear pattern, with an increasing trend from montane meadow to tropical herbosa. The order of the AGB density increase was: montane meadow (1 071.73 kg·hm^{-2}) < lowland meadow (1 552.45 kg·hm^{-2}) < tropical shrub herbosa (1 579.80 kg·hm^{-2}) < warm-temperate shrub herbosa (1 588.12 kg·hm^{-2}) < warm-temperate herbosa (1 771.02 kg·hm^{-2}) < tropical herbosa (2 004.37 kg·hm^{-2}). In the study, a remotely sensed vegetation index was first combined with field data on plant community. Using this approach, the accuracy of the results increased with 24.9%, compared with the traditional approach which relies only on remote sensing data. Thus in order to improve the accuracy of AGB estimation for grasslands at a large scale, it was recommended that future studies attempt to incorporate grassland height derived from Light Detection and Ranging equipment (LiDAR) data or optical stereo images.
Keywords: Yunnan Province; MODIS data; Aboveground biomass; Plant community characteristic; Space inversion

草地是陆地生态系统的重要组成部分，在全球气候变化和碳循环中扮演着重要角色[1]。草地生物量可以用来判断草地的生长状况和生产潜力，准确估算草地生物量及其动态变化对研究全球碳循环和评估草地植被的生态效益具有重要意义[2-3]。

我国草地面积为 3.55×10^8 hm^2，占国土面积的 41.7%[4]。自 20 世纪 90 年代中期，一些学者相继开展了我国草地植被生物量估算的研究[5-8]。这些研究主要集中在北方区域[9]，包括西藏、内蒙古、青海及新疆等地。如牛志春等[7]利用 TM 遥感图像和同期野外实测数据，建立了青海湖环湖地区草地植被生物量的遥感监测模型；张峰等[10]利用内蒙古典型草原连续 13 年的地上生物量(aboveground biomass, AGB)资料，基于遥感信息进行生态系统碳循环过程的 CASA 模型验证，并分析了内蒙古典型草原 1982—2002 年植被净初级生产力的时间变异及其影响因子。据统计，南方各省有草山草坡 6 000 多万 hm^2，占全国草地面积近 1/6[11]，在北方草地趋于退化的情形下[12-13]，南方草地在全国草地生态系统中的地位越发重要。然而，南方地形复杂、气候差异显著等因素导致草地的空间异质性非常明显，表现为草地类型繁多，且分布零散，因而对云南省草地生物量进行反演与估算的研究尚属空白[14]。

生物量估算模型一般为：①基于过程模型；②基于经验模型；③基于生物量扩张/转换因子或系数；④定点数据与遥感数据结合[15]。在以上方法中，定点数据与遥感数据结合的方法在大面积估算植被生物量时应用较多，尤其在具有野外生物量调查数据库的区域[15]。现有的清单数据和野外调查数据在进行植被生态系统年度动态评估时存在缺陷，包括缺乏连续的空间覆盖、较低的空间分辨率、行政边界间不连续和明显的时间滞后性等[16]。遥感数据具有广泛的空间覆盖、较高的时空分辨率及良好的一致性和稳定性[17-20]，可以从一定程度上弥补上述不足。植被遥感定量研究利用已有的实地调查数据，建立以遥感植被指数或者环境因子为自变量、生物量为因变量的回归模型，在此基础上推算整个区域的生物量[21]。在利用遥感影像(如 Landsat 和 MODIS 数据等)计算的各种植被指数中，归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)是较为常用的植被生物量指示指标，为监测不同尺度植被生物量的时空分异特征提供了一个理想的可量化参数[22-23]。但是，用 NDVI 估算生物量有一定的局限性，包括遥感平台及传感器性能限制、影像容易受到云和气溶胶的影响以及 NDVI 存在数据饱和的问题等[24-26]。前人研究发现，生物量随着物种组成和植被高度的变化而变化[27]，激光雷达具有直接测量冠层高度分布的特点，适合大面积生物量估算[20]。因此，

将植被群落特性信息(如，高度和盖度等)与 NDVI 联合，可以为植被生物量研究提供新的思路。本研究考虑到雷达数据的可获取性以及植被高度跟种群的相关性[26]，在进行草地生物量反演时加入草地植被群落特征参数，为用模型进行大面积生物量估算提供参考。

本文以云南省为研究区域，利用 MODIS 数据计算的 NDVI，结合同期草地 AGB 实测数据，建立基于 NDVI 的草地 AGB 估算模型，并应用植物群落的高度和盖度等特征，对估算模型进行优化，探讨①将植被群落特征信息引入草地 AGB 估算模型是否有助于提升估算精度；②云南省草地 AGB 的空间分布规律；③以云南为代表的南方草地在我国草地生态系统中的地位。旨在为我国草地生物量估算、载畜能力评估以及持续利用提供科学依据。

1 数据获取与研究方法

1.1 研究区概况

云南省地处中国西南边陲，位于 21°09′~29°15′N、97°30′~106°00′E(图 1)，区域海拔差异显著，为 76.4~6 740 m。云南省总土地面积为 3.94×10^7 hm^2，其中草地面积为 1.527×10^7 hm^2，占总土地面积的 38.7%，可利用草地面积为 1.187×10^7 hm^2[28]。气候类型属于高原型的热带季风气候，具有年温差小，日温差大，雨量充沛的气候特征。全省平均气温 24 ℃，年平均降雨量 1 100 mm，冬春季降水仅占年降水的 20%左右。良好的自然环境为植物生长提供了适宜的光照、土壤、气候等环境，形成了生物资源的多样性。根据实地调研情况，云南省的植被类型图主要有高寒草甸类、温性草原类、山地草甸类、暖性(灌)草丛类、热性(灌)草丛类、干热稀树灌草丛类等几大类。

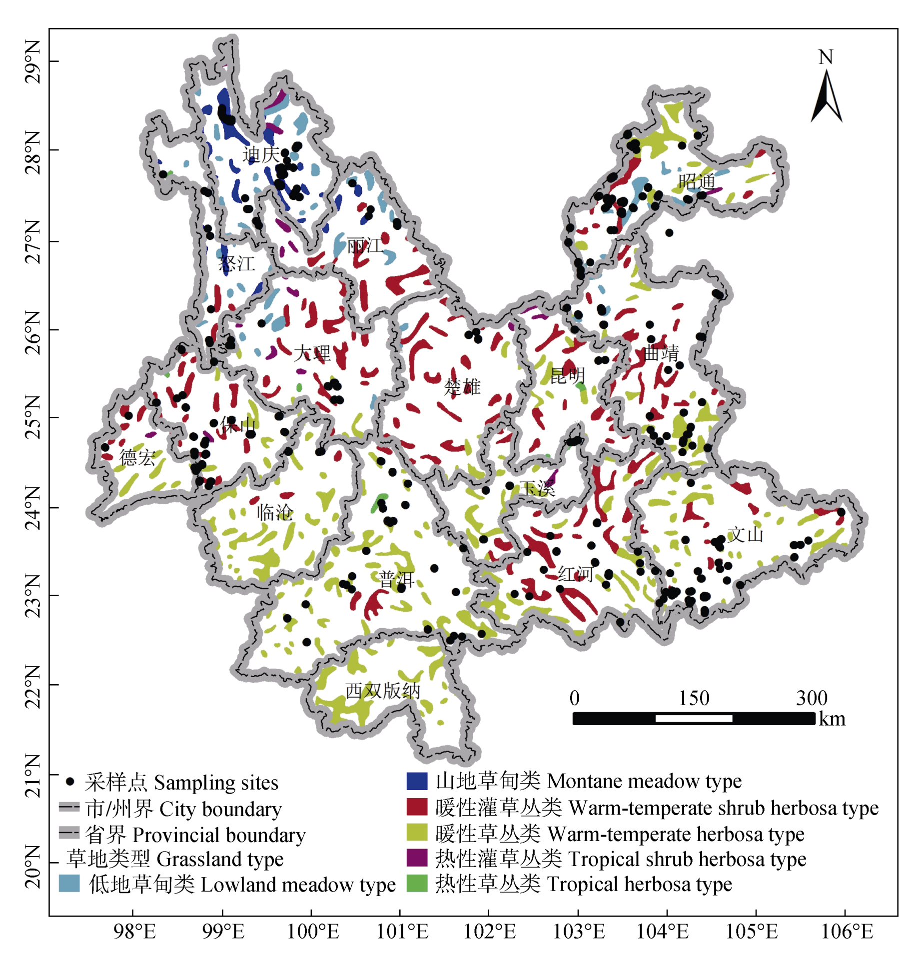


图 1 研究区草地生物量地面样点分布图

Fig. 1 Distribution of sampling sites of investigation of aboveground grassland biomass in the study area

1.2 研究方法

1.2.1 草地生物量地面调查

外业调查时间主要集中在 2012—2014 年草地生长季，根据草地类型的空间分布特征和面积大小，共在云南地区设计了 305 块调查样地。在 2012—2014 年 8—10 月期间，对分布面积较大的草地进行了调查，采样点包括云南省 58 个县/县级市。在进行数据处理时剔除了表现异常的个别采样点数据，最

终剩下 684 个数据用于建模和验证(图 1)，其中 2012 年设置 138 个采样点；2013 年设置 230 个样点；2014 年扩大了草地调查的范围和类型，设置了 316 个采样点。

样地设置在草地植被空间分布均一，具有代表性的典型地段。在植被群落均一性较好的样地内设置 1 或 2 个 0.5 m×0.5 m 的样方，在植被类型比较复杂、分布不均匀的区域设置 3 或 4 个 1.0 m×1.0 m 的样方。在样地的基本特征调查中，主要记录样地所隶属行政区、草地类型、地形、季节利用方式和利用状况等。利用 GPS 测定样方的经纬度和海拔，同时在样方内采用常规植被调查法测定植物种数、植被盖度、群落平均高度及总地上生物量等指标。

1.2.2　遥感数据获取及处理

本研究所使用的遥感数据为 USGS(美国地质调查局)提供的 EOS/MODIS MOD13Q1 数据，该数据空间分辨率为 250 m，是 16 d 合成图像，数据格式为 EOS-HDF，空间位置在全球正弦曲线投影 SIN(sinusoidal projection)系统中编号为 h26v06 和 h27v06 的两景图像，时间序列为 2012—2014 年草原生长季(8—10 月)，共计 6 幅云量小于 10%的遥感影像。

利用 MODIS 专业处理软件 MRT(MODIS Reprojection Tools)对下载的 NDVI 数据进行投影和格式转换处理，并设置为统一的 Albers 投影(第 1 标准纬度：25°N，第 2 标准纬度：47°N，中央经线：105°E，大地基准面：WGS84)。根据研究区植被特征，并参考国内外草地地上生物量相关研究，利用遥感软件 ENVI 及地理信息系统软件 ArcGIS，从 MODIS 数据中提取归一化植被指数 NDVI，计算公式[29]为：

$$\mathrm{NDVI}=\frac{\rho_{\mathrm{NIR}}-\rho_{\mathrm{R}}}{\rho_{\mathrm{NIR}}+\rho_{\mathrm{R}}} \tag{1}$$

式中：ρ_{NIR} 为近红外波段的反射率，ρ_{R} 为红光波段的反射率。

植被覆盖度与 NDVI 之间具有极显著线性相关关系，因此可以利用 NDVI 提取植被覆盖度信息[30-31]。根据像元二分模型，每个像元的 NDVI 值可以表达为由绿色植物部分所贡献的信息 $\mathrm{NDVI_{veg}}$ 与裸土部分所贡献的信息 $\mathrm{NDVI_{soil}}$2 部分组成，则植被覆盖度的公式[32]如下：

$$f_{\mathrm{c}}=\frac{\mathrm{NDVI}-\mathrm{NDVI_{soil}}}{\mathrm{NDVI_{veg}}-\mathrm{NDVI_{soil}}} \tag{2}$$

式中：f_{c} 为植被覆盖度；$\mathrm{NDVI_{soil}}$ 为完全裸土或无植被覆盖区域的 NDVI 值，本研究中选取土地单元内累积频率为 0.5%的 NDVI 值为 $\mathrm{NDVI_{soil}}$；$\mathrm{NDVI_{veg}}$ 则表示完全被植被覆盖区域的 NDVI 值，本研究中选取土地单元内累积频率为 99.5%的 NDVI 值为 $\mathrm{NDVI_{veg}}$。

1.2.3　回归模型建立与精度验证

利用统计软件 SPSS 进行 NDVI、植被特征信息(高度和盖度)与样点实测 AGB 数据的相关分析和回归分析，得到以 NDVI、植被特征为自变量的 AGB 遥感估算回归模型。然后，利用实测样点 AGB 数据与建立的遥感估算模型计算的 AGB 进行比较，通过均方根误差(RMSE)和估算精度(Accuracy)对模型进行精度分析[33]。RMSE 和 Accuracy 的计算公式如下：

$$\mathrm{RMSE}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(Y_i-Y_i')^2}{N}} \tag{3}$$

$$\mathrm{Accuracy}=(1-\frac{\mathrm{RMSE}}{\overline{Y}})\times 100\% \tag{4}$$

式中：RMSE 为均方根误差；Accuracy 为估算精度，Y_i 为实测草地 AGB($\mathrm{g\cdot m^{-2}}$)，Y_i'为草地 AGB 估算值($\mathrm{g\cdot m^{-2}}$)，$\overline{Y}$ 为实测草地 AGB 平均值($\mathrm{g\cdot m^{-2}}$)，N 为样点数。

2　结果与分析

2.1　AGB-NDVI 建模与检验

从 2012—2014 年地面样方调查的 684 个 AGB 数据里面随机挑选出 600 个数据，用 ArcGIS 从 MODIS 数据中提取与地面样方位置对应的同时期 NDVI 值，建立草地单位面积的 AGB 与 NDVI 的一元线性回归方程。结果发现 AGB 与 NDVI 呈显著正线性相关(R=0.297, P<0.01)，回归方程为：

$$y=3\,331.172x-405.647 \tag{5}$$

式中：y 为 AGB，x 为 NDVI。

将预留的 84 个地面样方数据代入公式(3)和(4)对回归方程(5)进行精度验证，发现估算精度为 35.0%(图 2)。

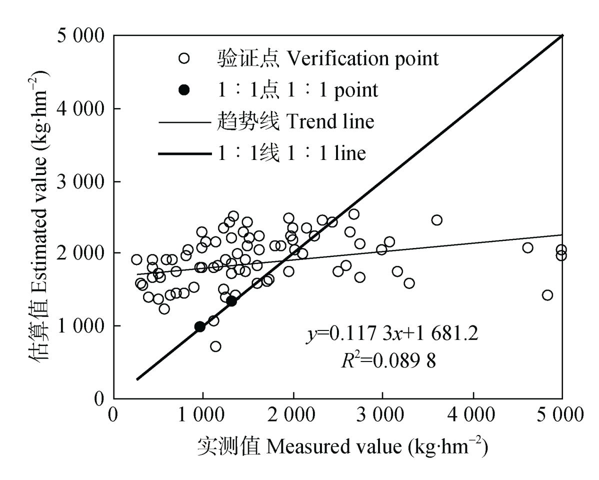


图 2　云南省草地地上生物量(AGB)基于 NDVI 的估算精度验证

Fig. 2　Accuracy validation for grassland aboveground biomass estimation based on NDVI in Yunnan Province

2.2 不同类型草地植被特征与生物量

据从云南省获得的草地 AGB 野外调查资料可知，云南省主要的草地植被类型有 9 大类(图 3)。从图 3 可以看出，随着草地类型由高寒到温性、再到热性的变化过程中，草地植被的平均高度(average height，AH)逐渐增加，平均盖度(average coverage，AC)没有明显变化，而草地植被的 AGB 呈现出逐渐增大的趋势。此外，草地 AGB 和 AH 的标准误差较大，而 AC 的标准误差较小，说明在同类草地植被中，AGB 和 AH 的变化波动较大，AC 的变化较小。进一步对 AGB 与 AH 和 AC 做相关性分析，结果显示 AGB 与 AH、AC 均有明显的正相关关系(表 1)。因此，融入草地植被的群落特征(高度和盖度)有助于更准确地估算草地 AGB。

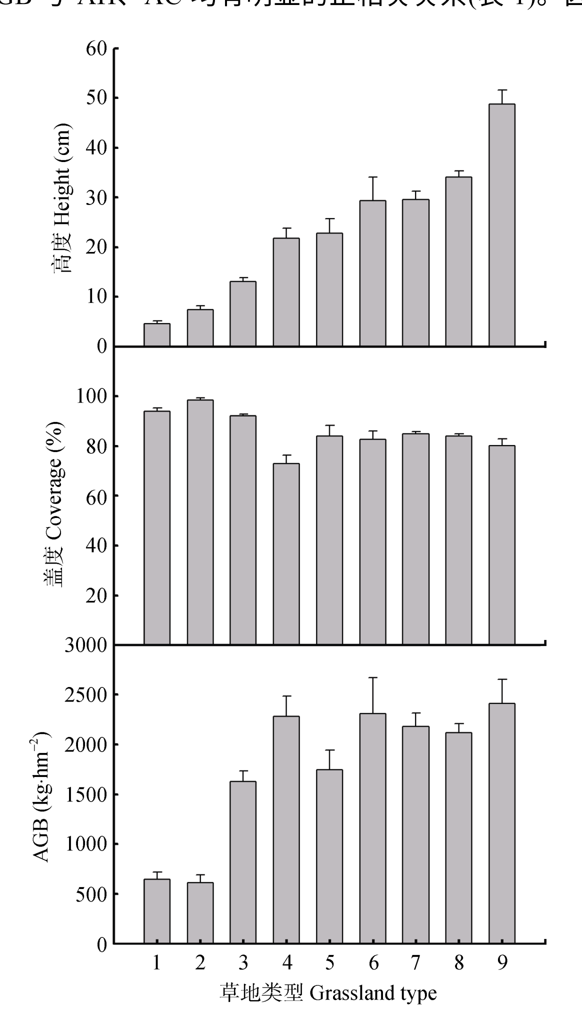


图 3 云南省不同草地植被类型的高度、盖度及地上部生物量(AGB)

Fig. 3 Height, coverage and aboveground biomass (AGB) of different types of grassland in Yunnan Province

1: 高寒草甸类; 2: 高寒草甸草原类; 3: 山地草甸类; 4: 暖性草丛类; 5: 暖性灌草丛类; 6: 温性草甸草原类; 7: 热性灌草丛类; 8: 热性草丛类; 9: 干热稀树灌草丛类。1: alpine meadow type; 2: high-cold meadow-steppe type; 3: montane meadow type; 4: warm-temperate herbosa type; 5: warm-temperate shrub herbosa type; 6: temperate meadow-steppe type; 7: tropical shrub herbosa type; 8: tropical herbosa type; 9: arid-tropical shrub herbosa scattered with tree type.

表 1 云南省草地地上部生物量(AGB)与植被高度(AH)和盖度(AC)的相关分析

Table 1 Correlation analysis between aboveground biomass (AGB) and height (AH) and coverage (AC) of grassland in Yunnan Province

	AGB-AH	AGB-AC
相关系数 Correlation coefficient (R)	0.539	0.104
P	0.000	0.004

2.3 草地 AGB 估算模型优化

将植被群落特征信息加入回归模型，用 600 个样点进行以 AGB 为因变量，以 NDVI、高度和盖度为自变量的多元线性回归分析，结果发现回归方程的拟合优度有了显著提升(R=0.614，P<0.01)，通过检验发现各自变量之间不存在多重共线性(表 2)。回归方程为：

$$y=2\,280.171x_1+36.842x_2+15.892x_3-2\,015.156 \quad (6)$$

式中：y 为 AGB，x_1 为 NDVI，x_2 为植被平均高度，x_3 为植被盖度。

将预留的 84 个地面样点数据代入公式(3)和(4)对回归方程(6)进行精度验证，发现估算精度提升为 43.7%(图 4)。优化后的回归模型比之前的拟合优度提升了 0.289，估算精度提高了 8.7%，显然，模型的优化对于准确估算云南省草地 AGB 具有很好的促进作用。

表 2 云南省草地地上部生物量估算回归模型系数及其检验结果

Table 2 Coefficient of equation and its test result for estimation of grassland aboveground biomass in Yunnan Province

	系数 Coefficient	T	P	方差膨胀因子 VIF
归一化植被指数 NDVI	2 280.171	6.107	0.000	1.057
高度 Height	36.842	16.178	0.000	1.051
盖度 Coverage	15.892	4.883	0.000	1.019
常数项 Constant term	−2 015.156	−5.078	0.000	—

2.4 云南省 AGB 反演与空间分布特征

在利用优化后的回归模型对云南省草地 AGB 进行反演时，考虑到全局空间范围草地植被群落特性数据的可获取性，在本研究中进行了数据的简化处理，即用不同类型草地植被的平均高度代替真实高度，然后代入回归模型应用 GIS 中的栅格计算器等技术手段进行空间反演。

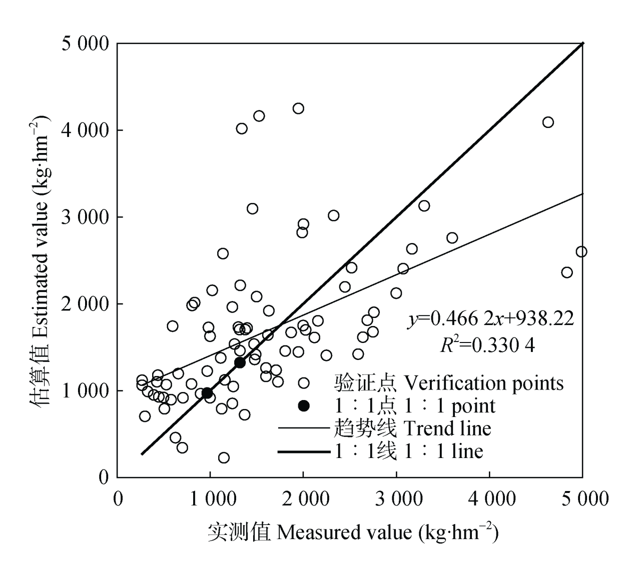


图 4　云南省草地地上生物量(AGB)基于 NDVI 和植物特性的估算精度验证

Fig. 4　Accuracy validation for grass aboveground biomass estimation based on NDVI and plant characteristics (height and coverage) in Yunnan Province

在 1∶100 万草地类型图分类系统中，未对云南省的高寒草甸、高寒草甸草原、温性草甸草原和干热稀树灌草丛这 4 类较少的草地类型进行统计，只统计了优势种群。因此根据分类系统将研究区草地分为 6 种类型：低地草甸类、山地草甸类、暖性草丛类、暖性灌草丛类、热性草丛类及热性灌草丛类。其中，除了低地草甸类外，其余类型草地的高度在地面样方调查中均有统计(图 3)；根据以前的研究[5,34]，低地草甸的高度为 18.77~31.00 cm，取其平均值，得到低地草甸的 AH 为 24.89 cm。最终得到云南省 6 种主要草地类型的 AH 及其标准误(表 3)。

根据从 MODIS 数据中提取的 2012—2014 年的 NDVI 数据，利用 ArcGIS 计算 3 年 NDVI 的最大值、最小值和平均值(图 5)；AH 的最大值为均值减去标准误，AH 的最小值为平均值减去标准误；根据 NDVI，可以计算得出植被覆盖度的最大值、平均值和最小值(图 6)。再应用 GIS 中的栅格计算器将 NDVI 值、AH 及植被覆盖度代入回归模型(6)，进行云南省草地生物量的空间反演，得到 3 年 AGB 密度的最大值、最小值和平均值(图 7)。可以看出，云南省草地 AGB 具有明显的空间分布特征，西部 AGB 密度普遍比东部高，南部总体上比北部高，这可能与气温、降水等环境因素的影响有关。

表 3　云南省主要草地类型的植被特征

Table 3　Vegetation characteristics of main grassland types in Yunnan Province

草地植被类型 Grassland type	平均高度 Average height (cm)		平均盖度 Average cover (%)	
	均值 Mean value	标准误差 Standard error	均值 Mean value	标准误差 Standard error
低地草甸类 Lowland meadow type	24.89	—	78.73	—
山地草甸类 Montane meadow type	12.60	0.70	92.01	0.80
暖性草丛类 Warm-temperate herbosa type	21.30	2.04	71.67	3.43
暖性灌草丛类 Warm-temperate shrub herbosa type	23.78	2.99	82.44	4.71
热性草丛类 Tropical herbosa type	33.21	1.26	84.07	0.92
热性灌草丛类 Tropical shrub herbosa type	29.62	1.78	84.94	0.91

云南省 2012—2014 年草地 AGB 密度介于 1 376.76~1 888.51 kg·hm^{-2}，平均为 1 637.21 kg·hm^{-2}。云南省总的草地面积为 7 458 498.06 hm^2，由此计算得到，年均总的草地 AGB 介于 1 026.86 万~1 408.54 万 t，平均为 1 221.11 万 t。从行政分区上看(表 4)，密度较大的草地位于西双版纳、德宏和普洱等地，主要分布在云南的南部和西南部地区；而密度较小的草地位于西北的迪庆和东部的曲靖等地。总 AGB 最大的地区位于红河哈尼族彝族自治州，达 148.16 万 t，其次是普洱、昭通等地，而总 AGB 最小的地区位于德宏和怒江傈僳族自治州等地。

经过统计发现，不同草地类型的 AGB 差异较大(表 5)，从图 1 的草地类型分布图中可以看出，AGB 密度最小的山地草甸类主要分布在云南的西北部，而最大的热性草丛和暖性草丛主要分布在中部和南部。暖性草丛和暖性灌草丛分布最为广泛，这两类草地的总体 AGB 也较大，分别达 611.26 万 t 和 412.92 万 t。

3　讨论

空间异质性是草地生态系统的一个重要特征[35]，不同类型的草地植被之间，高度和盖度等植被特征存在明显的差异。徐敏云等[34]对河北省草地盖度、高度和产草量的年际变化进行了监测研究，发现 7 种类型的草地植被之间的盖度差异很大，其中山地草甸的植被盖度最大，为 93.97%；温性草原的植被盖度最小，为 57.63%。草地之间的高度差异也比较显著，暖性草丛草地植被高度最高，为 49.25 cm；

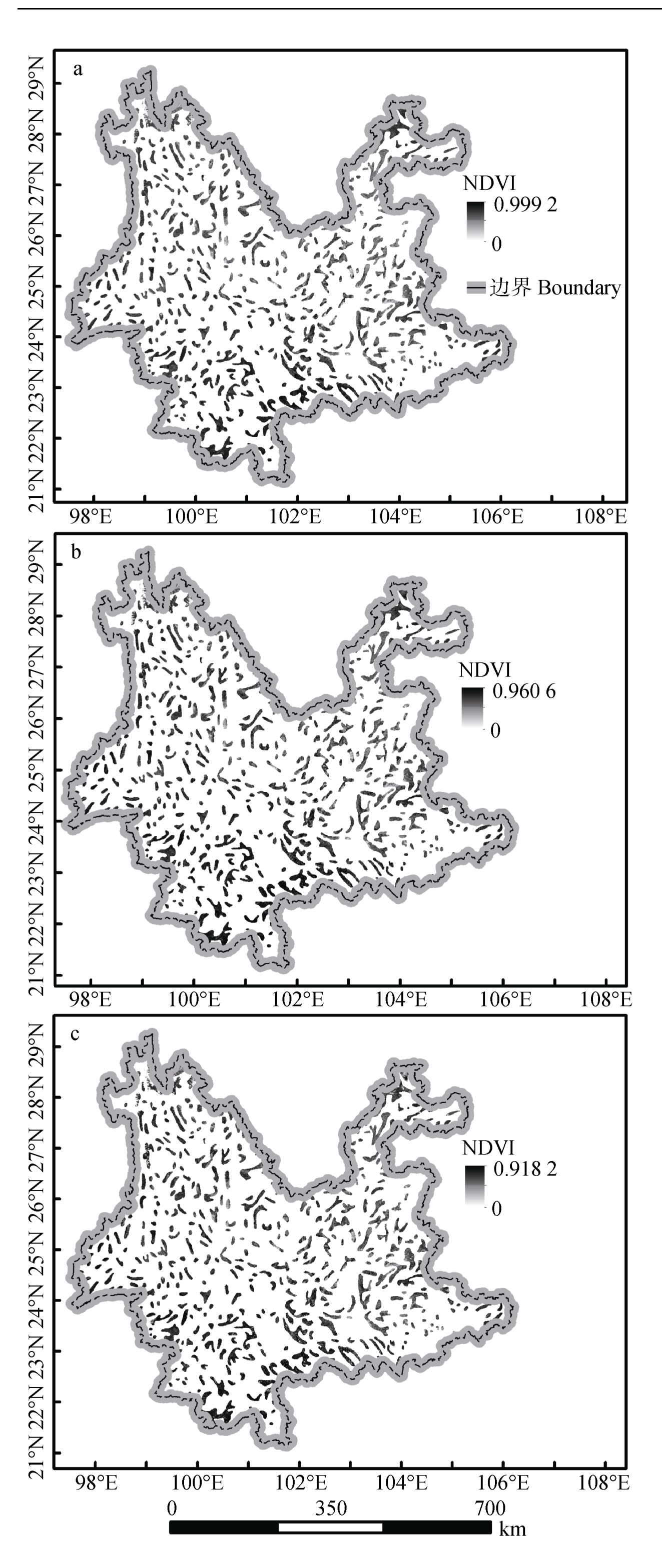


图 5 2012—2014 年云南省草地 NDVI 的最大值(a)、平均值(b)和最小值(c)

Fig. 5 Maximum (a), mean (b) and minimum (c) values of NDVI of grassland from 2012 to 2014 in Yunnan Province

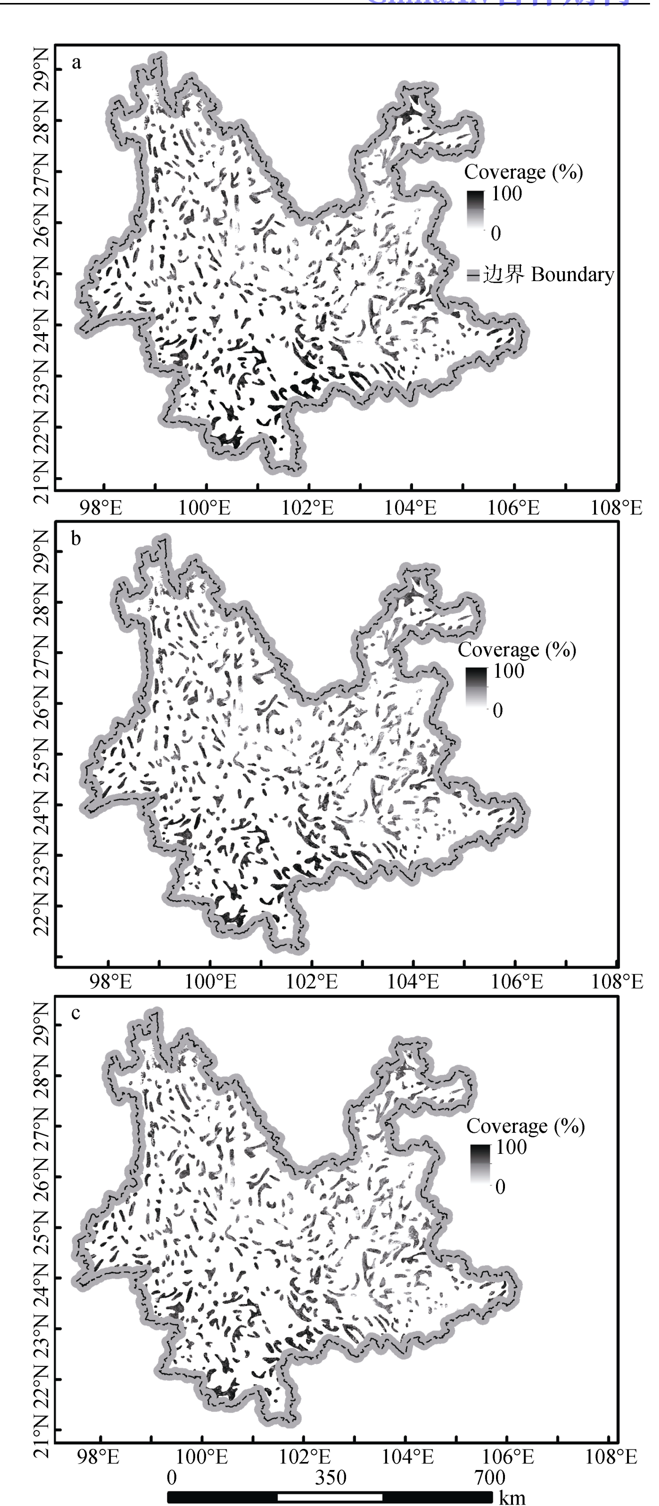


图 6 2012—2014 年云南省草地植被覆盖度(Coverage)的最大值(a)、平均值(b)和最小值(c)

Fig. 6 Maximum (a), mean (b) and minimum (c) values of vegetation coverage of grassland from 2012 to 2014 in Yunnan Province

低地草甸最低，为 18.77 cm。高阳等[36]根据气候-植被特征，选取森林草原、典型草原和荒漠草原 3 种不同类型草地进行群落特征研究，结果也表明 3 种草地的盖度和高度存在显著性差异。云南省山地面积约占 94%，且地形陡峭、切割破碎[37]，是全球地形地貌最复杂多变的地区之一；全省海拔相差很大，最高点与最低点相差 6 663.6 m[38]。特殊的地形地貌和悬殊的海拔差异形成了云南多样性气候，控制了复杂的水热条件引起的物种选择、资源竞争和生境变化，造成了生态系统的物种多样性[39]，由此形成

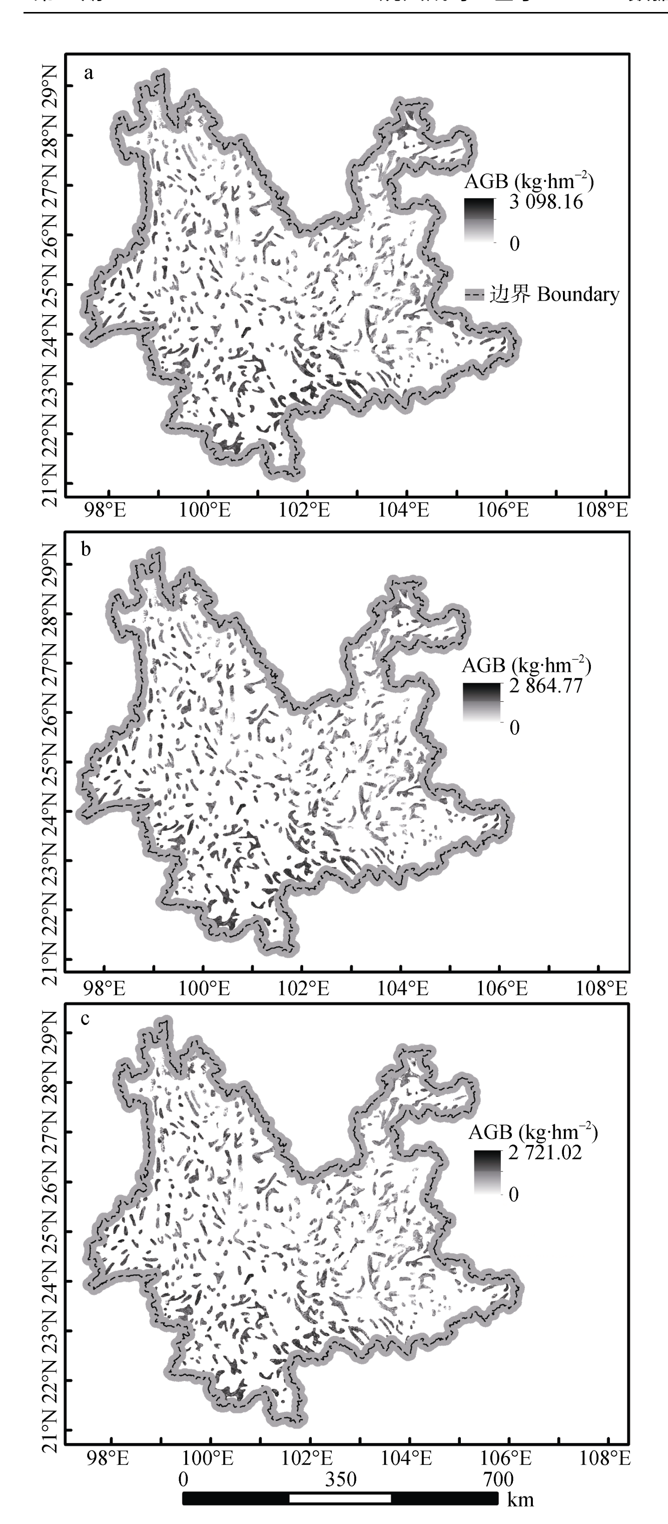


图 7　2012—2014 年云南省草地地上部生物量(AGB)的最大值(a)、平均值(b)和最小值(c)

Fig. 7　Maximum (a), mean (b) and minimum (c) values of aboveground biomass (AGB) of grassland from 2012 to 2014 in Yunnan Province

草地群落间显著的空间异质性。本研究(表 3)表明，云南不同类型的草地植被盖度和高度差异明显，与徐敏云等[34]的结果基本一致。

草地植被的高度、盖度等特征是描述群落生长状况、反映产量高低较为理想的特征量[40]。大多数

表 4　云南省各市/州 2012—2014 年草地平均地上部生物量(ABG)

Table 4　Averages of above ground biomass (AGB) of grassland of cites in Yunnan Province from 2012 to 2014

市(自治州) City (Autonomous prefecture)	草地面积 Grassland area (hm^2)	AGB (kg·hm^{-2})	总 AGB Total AGB (10^4 t)
昆明 Kunming	356 902.24	1 439.78	51.39
曲靖 Qujing	584 349.21	1 343.79	78.52
玉溪 Yuxi	327 826.73	1 663.43	54.53
昭通 Zhaotong	588 218.43	1 530.57	90.03
楚雄 Weichu	471 578.27	1 531.66	72.23
红河 Honghe	877 068.51	1 689.25	148.16
文山 Wenshan	421 052.99	1 605.48	67.60
普洱 Puer	722 718.19	1 998.01	144.40
西双版纳 Xishuangbanna	410 845.97	2 116.03	86.94
大理 Dali	491 058.55	1 593.07	78.23
保山 Baoshan	318 075.86	1 826.86	58.11
德宏 Dehong	182 384.74	2 033.23	37.08
丽江 Lijiang	403 010.93	1 519.37	61.23
怒江 Nujiang	263 080.30	1 623.76	42.72
迪庆 Diqing	608 272.92	1 130.12	68.74
临沧 Lincang	432 054.24	1 881.79	81.30
总计 Total	7 458 498.06	—	1 221.21

表 5　云南省各市/州 2012—2014 年不同类型草地平均地上部生物量(AGB)

Table 5　Averages of above ground biomass (AGB) of different types of grassland in Yunnan Province from 2012 to 2014

草地类型 Grassland type	草地面积 Grassland area (hm^2)	AGB (kg·hm^{-2})	总 AGB Total AGB (10^4 t)
低地草甸类 Lowland meadow	667 354.90	1 552.45	103.60
山地草甸类 Montane meadow	521 531.62	1 071.73	55.89
暖性草丛类 Warm-temperate herbosa	3 451 442.61	1 771.02	611.26
暖性灌草丛类 Warm-temperate shrub herbosa	2 600 033.82	1 588.12	412.92
热性草丛类 Tropical herbosa	72 091.93	2 004.37	14.45
热性灌草丛类 Tropical shrub herbosa	276 218.11	1 579.80	43.64
总计 Total	7 458 498.06	—	1 221.21

草地植被高度增长与生物量增长呈正相关，生物量峰值与植株高度峰值同时出现[41]。本研究中植被高度与生物量呈显著的正相关(R=0.539, P<0.001)。草地植被盖度也是生物量高低的重要表征量，陈生云等[42]在研究植被物种多样性和生物量的关系时，发现群落盖度与生物量具有极显著的线性相关关系(R=0.96, P<0.001)，与本研究结果相符(R=0.104, P<0.001，表 2)。因此，本研究综合 MODIS 数据与实测

的不同类型草地特征数据进行草地AGB的估算，使估算精度比传统的光学遥感模拟方法显著提升了24.9%，而此方法对于准确估算草地AGB的应用尚少见报道。大量研究证实森林垂直结构参数的反演有助于森林生物量的估测，于颖等[43]通过对大光斑激光雷达数据GLAS波形的处理，建立模型反演森林生物量，理论精度达到91.3%。本研究方法为今后估算草地生物量提供了一个新的思路。

结果显示云南省2012—2014年草地AGB均值为1 221.11万t，在相同的草地面积下，朴世龙等[8]在全国尺度估算的云南省草地生物量比本研究估算的均值低185.11万t；在区域水平上，Xu等[44]利用MODIS影像和地面实测数据估算了全中国6大草地区域的生产力，得出云南省2004的估算结果为1 520.33万t, 2005年为1 154.87万t，与本研究估算结果接近。由于Xu等[44]采用的云南省草地面积(104 274 km^2)大于本研究的草地面积，因此计算的单位面积生物量(1 108 kg·hm^{-2})小于本研究的结果。与以往在中国北方的研究结果相比，云南草地AGB平均密度普遍大于北方，如马文红等[45]利用AGB与遥感数据之间的关系，计算出中国北方草地AGB密度为790 kg·hm^{-2}；贾峰等[46]将19个北方草地地面定位监测点的实测资料数据进行了分析、归纳和总结，得出中国北方典型草原草地的AGB密度为1 112 kg·hm^{-2}。我国草地植被总AGB为29 232万t[8]，本研究结果显示云南生物量范围为1 026.86万~1 408.54万t，按照这一估算范围，计算出云南草地生物量占全国比重介于3.5%~4.8%，在计算全国草地生物量时不可忽略。

本研究利用植被群落特征信息提升了复杂地形条件下草地生物量估算精度，但在方法上仍存在一些不确定性。首先，采用的是1∶100万草地分类地图，难免会忽略面积较小的草地，造成总的草地面积偏小，使估算的总生物量偏小。其次，在进行空间尺度转换时可能会产生误差[47]：使用的是250 m空间分辨率的MODIS影像，影像算法容易将分散的小块草地和大块草地的边缘判别为非草地植被类型的地块，由此计算的NDVI可能与实地调研的生物量数据不匹配，在进行模拟时会高估生物量；1∶100万草地类型图与250 m分辨率的遥感影像在进行空间匹配时，地图边缘会产生像元带来的误差，这种误差是难以避免且不容易评估的。此外，只对整个云南省的草地数据进行统一建模，并未分植被类型建模，没有充分考虑不同草地类型相对独立的特点和规律，因此建立的模型具有一定的不确定性。如果采用更高分辨率的遥感影像(比如Landsat数据)可能会减小尺度转换带来误差，但可能带来新的问题，例如：整个云南省共需17幅Landsat影像，在进行拼接时，难免出现边界突变的状况，而且经常遇到所需时期的影像有云遮盖的情况，这将导致在计算植被指数时产生偏差。因此，综合考虑后采用MODIS数据。利用激光雷达数据(LiDAR)获取的植被真实高度能让估算结果更加精确[20]，但这类数据尚未大范围应用于草地植被，从数据获取到数据处理都不成熟[48]。本文只能采用简化处理手段，用不同类型草地植被的平均高度代替真实高度，做初步的探索性研究，精确估算大面积的草地AGB，需要进一步探索如何从激光雷达数据或遥感立体影像中提取植被的垂直特征信息。

4 结论

本研究综合遥感数据与地面实测生物量数据，采用优化的估算模型分析了云南省草地AGB及其空间分布格局，得出以下结论：

1)用植被特征信息(高度和盖度)确实优化了草地AGB遥感估算模型，优化后的模型比之前的拟合优度提升0.289，使估算精度提高24.9%，此方法更适宜地势复杂、气候多变、草地植被类型分布零散的区域。

2)云南省2012—2014年草地年均AGB介于1 026.86万~1 408.54万t，平均为1 221.11万t，占全国的4.1%，表明在计算全国生物量时不可忽视以云南为代表的南方草地。云南省草地AGB密度总体上呈现西部高东部低、南部高北部低的空间分布格局。

3)云南省各市/州之间草地AGB密度介于1 130.12~2 116.03 kg·hm^{-2}；不同草地类型之间AGB密度相差较大，由山地草甸到暖性草丛再到热性草丛有增大的趋势，表现为：山地草甸类(1 071.73 kg·hm^{-2})<低地草甸类(1 552.45 kg·hm^{-2})<热性灌草丛类(1 579.80 kg·hm^{-2})<暖性灌草丛类(1 588.12 kg·hm^{-2})<暖性草丛类(1 771.02 kg·hm^{-2})<热性草丛类(2 004.37 kg·hm^{-2})。

致谢 *衷心感谢在云南省草地生物量野外调查过程中提供帮助的工作人员；感谢朱再春博士帮助修改文章。*

参考文献 References

[1] 赵明伟，岳天祥，孙晓芳，等. 基于草地综合顺序分类系统(IOCSG)的中国北方草地地上生物量高精度模拟[J]. 生态学报, 2014, 34(17): 4891–4899
Zhao M W, Yue T X, Sun X F, et al. High accuracy simulation

of aboveground biomass in northern China based on IOCSG[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(17): 4891–4899

[2] Mao D H, Wang Z M, Li L, et al. Spatiotemporal dynamics of grassland aboveground net primary productivity and its association with climatic pattern and changes in Northern China[J]. Ecological Indicators, 2014, 41: 40–48

[3] Le Toan T, Quegan S, Davidson M M J, et al. The biomass mission: Mapping global forest biomass to better understand the terrestrial carbon cycle[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(11): 2850–2860

[4] 张彩琴, 张军, 李茜若. 草地植被生物量动态研究视角与研究方法评述[J]. 生态学杂志, 2015, 34(4): 1143–1151
Zhang C Q, Zhang J, Li X R. A review on the research perspectives and methods for grassland vegetation biomass dynamics[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(4): 1143–1151

[5] 韩广. 东北平原西部低地草甸的遥感估产模型研究[J]. 遥感技术与应用, 1996, 11(2): 20–25
Han G. A study on the mathematical model of remote rensing estimating yield for lowland meadow in the western part of northeast plain[J]. Remote Sensing Technology and Application, 1996, 11(2): 20–25

[6] Ni J. Carbon storage in grasslands of China[J]. Journal of Arid Environments, 2002, 50(2): 205–218

[7] 牛志春, 倪绍祥. 青海湖环湖地区草地植被生物量遥感监测模型[J]. 地理学报, 2003, 58(5): 695–702
Niu Z C, Ni S X. Study on models for monitoring of grassland biomass around Qinghai Lake assisted by remote sensing[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(5): 695–702

[8] 朴世龙, 方精云, 贺金生, 等. 中国草地植被生物量及其空间分布格局[J]. 植物生态学报, 2004, 28(4): 491–498
Piao S L, Fang J Y, He J S, et al. Spatial distribution of grassland biomass in China[J]. Acta Phytoecologica Sinica, 2004, 28(4): 491–498

[9] 刘思瑶. 遥感过程模型应用于中国南方草地近 30 年碳储量变化的研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2014
Liu S Y. Carbon storage changes in grassland of southern China between 1982 to 2012 by remote sensing process model[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014

[10] 张峰, 周广胜, 王玉辉. 基于 CASA 模型的内蒙古典型草原植被净初级生产力动态模拟[J]. 植物生态学报, 2008, 32(4): 786–797
Zhang F, Zhou G S, Wang Y H. Dynamics simulation of net primary productivity by a satellite data-driven CASA model in inner Mongolian typical steppe, China[J]. Journal of Plant Ecology, 2008, 32(4): 786–797

[11] 孙成明, 刘涛, 田婷, 等. 基于 MODIS 的南方草地 NPP 遥感估算与应用[J]. 草业学报, 2013, 22(5): 11–17
Sun C M, Liu T, Tian T, et al. Remote sensing estimation and application of grassland NPP based on MODIS data in southern China[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2013, 22(5): 11–17

[12] 姜晔, 毕晓丽, 黄建辉, 等. 内蒙古锡林河流域植被退化的格局及驱动力分析[J]. 植物生态学报, 2010, 34(10): 1132–1141
Jiang Y, Bi X L, Huang J H, et al. Patterns and drivers of vegetation degradation in Xilin River Basin, Inner Mongolia, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(10): 1132–1141

[13] 赵英伟, 刘黎明, 白晓飞. 西部大开发草地资源可持续利用评价与发展对策[J]. 中国生态农业学报, 2004, 12(2): 15–18
Zhao Y W, Liu L M, Bai X F. Evaluation and countermeasures of the sustainable utilization of grassland resources in development of western China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2004, 12(2): 15–18

[14] 孙成明, 刘涛, 田婷, 等. 南方 3 种类型草地地上生物量的光谱估测模型[J]. 扬州大学学报: 农业与生命科学版, 2012, 33(4): 51–55
Sun C M, Liu T, Tian T, et al. Hyperspectral estimation model of above-ground biomass of three kinds of grassland types in South China[J]. Journal of Yangzhou University: Agricultural and Life Science Edition, 2012, 33(4): 51–55

[15] Wang G X, Oyana T, Zhang M Z, et al. Mapping and spatial uncertainty analysis of forest vegetation carbon by combining national forest inventory data and satellite images[J]. Forest Ecology and Management, 2009, 258(7): 1275–1283

[16] Gu Y X, Wylie B K, Bliss N B. Mapping grassland productivity with 250-m eMODIS NDVI and SSURGO database over the Greater Platte River Basin, USA[J]. Ecological Indicators, 2013, 24: 31–36

[17] Kumar L, Schmidt K, Dury S, et al. Imaging spectrometry and vegetation science[M]//van der Meer F D, De Jong S M. Imaging Spectrometry. Netherlands: Springer, 2001: 111–155

[18] Wylie B K, Zhang L, Bliss N, et al. Integrating modelling and remote sensing to identify ecosystem performance anomalies in the boreal forest, yukon river basin, alaska[J]. International Journal of Digital Earth, 2008, 1(2): 196–220

[19] Psomas A, Kneubühler M, Huber S, et al. Hyperspectral remote sensing for estimating aboveground biomass and for exploring species richness patterns of grassland habitats[J]. International Journal of Remote Sensing, 2011, 32(24): 9007–9031

[20] Zolkos S G, Goetz S J, Dubayah R. A meta-analysis of terrestrial aboveground biomass estimation using lidar remote sensing[J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 128: 289–298

[21] Myneni R, Dong J, Tucker C, et al. A large carbon sink in the woody biomass of northern forests[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2001, 98(26): 14784–14789

[22] Zhang B H, Zhang L, Xie D, et al. Application of synthetic NDVI time series blended from Landsat and MODIS data for grassland biomass estimation[J]. Remote Sensing, 2015, 8(1): 10

[23] 李素英, 李晓兵, 莺歌, 等. 基于植被指数的典型草原区生物量模型——以内蒙古锡林浩特市为例[J]. 植物生态学报, 2007, 31(1): 23–31
Li S Y, Li X B, Ying G, et al. Vegetation indexes-biomass models for typical semi-arid stepp — A case study for

Xilinhot in northern China[J]. Journal of Plant Ecology, 2007, 31(1): 23–31
[24] Mutanga O, Skidmore A K. Hyperspectral band depth analysis for a better estimation of grass biomass (*Cenchrus ciliaris*) measured under controlled laboratory conditions[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2004, 5(2): 87–96
[25] Hyde P, Dubayah R, Walker W, et al. Mapping forest structure for wildlife habitat analysis using multi-sensor (LiDAR, SAR/InSAR, ETM+, Quickbird) synergy[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 102(1/2): 63–73
[26] Zhang G, Ganguly S, Nemani R R, et al. Estimation of forest aboveground biomass in california using canopy height and leaf area index estimated from satellite data[J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 151: 44–56
[27] Zheng D L, Rademacher J, Chen J Q, et al. Estimating aboveground biomass using Landsat 7 ETM+ data across a managed landscape in Northern Wisconsin, USA[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 93(3): 402–411
[28] 洪世奇, 李晓兵, 刘学敏, 等. 云南省生态建设与常绿草地畜牧业基地的建设[J]. 资源科学, 2004, 26(3): 35–43
Hong S Q, Li X B, Liu X M, et al. Ecological construction and evergreen grassland stockbreeding development in Yunnan Province[J]. Resources Science, 2004, 26(3): 35–43
[29] Beck P S A, Atzberger C, Høgda K A, et al. Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: A new method using MODIS NDVI[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 100(3): 321–334
[30] Gutman G, Ignatov A. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models[J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(8): 1533–1543
[31] 潘卫华, 陈家金, 陈惠, 等. 基于 MODIS 数据的福建省干旱遥感动态监测分析[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(4): 1015–1019
Pan W H, Chen J J, Chen H, et al. Dynamic monitoring of drought in Fujian Province from MODIS remote sensing data[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, 16(4): 1015–1019
[32] 吴云, 曾源, 赵炎, 等. 基于 MODIS 数据的海河流域植被覆盖度估算及动态变化分析[J]. 资源科学, 2010, 32(7): 1417–1424
Wu Y, Zeng Y, Zhao Y, et al. Monitoring and dynamic analysis of fractional vegetation cover in the Hai River Basin based on MODIS data[J]. Resources Science, 2010, 32(7): 1417–1424
[33] 田艳林, 刘贤赵, 毛德华, 等. 基于 MODIS 数据的松嫩平原西部芦苇湿地地上生物量遥感估算[J]. 生态学报, 2016, 36(24): 8071–8080
Tian Y L, Liu X Z, Mao D H, et al. Remote sensing estimation of the aboveground biomass of reed wetland in the western Songnen Plain, China, based on MODIS data[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(24): 8071–8080
[34] 徐敏云, 李运起, 王堃, 等. 河北省草地资源分布及植被特征动态[J]. 草业学报, 2009, 18(6): 1–11
Xu M Y, Li Y Q, Wang K, et al. Spatial distribution and dynamic characteristics of the grassland vegetation in Hebei[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2009, 18(6): 1–11
[35] 张鹏莉, 陈俊, 崔树娟, 等. 禁牧条件下不同类型草地群落结构特征[J]. 生态学报, 2013, 33(2): 425–434
Zhang P L, Chen J, Cui S J, et al. The community characteristics of different types of grassland under grazing prohibition condition[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(2): 425–434
[36] 高阳, 程积民, 刘伟. 黄土高原地区不同类型天然草地群落学特征[J]. 草业科学, 2011, 28(6): 1066–1069
Gao Y, Cheng J M, Liu W. Community characteristics of different types of grassland in the Loess Plateau[J]. Pratacultural Science, 2011, 28(6): 1066–1069
[37] 段旭, 陶云, 刘建宇, 等. 云南省不同地质地貌条件下滑坡泥石流与降水的关系[J]. 气象, 2007, 33(9): 33–39
Duan X, Tao Y, Liu J Y, et al. The relationship between the landslide and debris flows and the precipitation in Yunnan Province under conditions of different geology and geomorphology[J]. Meteorological Monthly, 2007, 33(9): 33–39
[38] 段旭, 陶云. 云南近 50 年来的气候变化[J]. 热带气象学报, 2012, 28(2): 243–250
Duan X, Tao Y. The climate change of Yunnan over the last 50 years[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2012, 28(2): 243–250
[39] 刘利利, 盛建东, 程军回, 等. 新疆不同草地类型植物物种特征与水热因子的关系研究[J]. 草业学报, 2016, 25(5): 1–12
Liu L L, Sheng J D, Cheng J H, et al. Relationship between plant species characteristics and climate factors in different grassland types of Xinjiang[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(5): 1–12
[40] 王丽学, 程积民, 万惠娥, 等. 云雾山天然草地植物生长规律[J]. 生态学报, 2008, 28(7): 3168–3175
Wang L X, Cheng J M, Wan H E, et al. The plant growth patterns in the natural grassland of Yunwu Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(7): 3168–3175
[41] 王义凤. 大针茅草原地上生物量形成的规律与特点[J]. 植物生态学报, 1989, 13(4): 297–308
Wang Y F. The feature and rule of formation of aboveground biomass of *Stipa grandis* steppe[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 1989, 13(4): 297–308
[42] 陈生云, 刘文杰, 叶柏生, 等. 疏勒河上游地区植被物种多样性和生物量及其与环境因子的关系[J]. 草业学报, 2011, 20(3): 70–83
Chen S Y, Liu W J, Ye B S, et al. Species diversity of vegetation in relation to biomass and environmental factors in the upper area of the Shule River[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2011, 20(3): 70–83
[43] 于颖, 范文义, 李明泽, 等. 利用大光斑激光雷达数据估测树高和生物量[J]. 林业科学, 2010, 46(9): 84–87
Yu Y, Fan W Y, Li M Z, et al. Estimation of forest tree heights and biomass from GLAS data[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(9): 84–87

[44] Xu B, Yang X, Tao W G, et al. Modis-based remote sensing monitoring of grass production in China[J]. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29(17/18): 5313–5327

[45] 马文红, 方精云, 杨元合, 等. 中国北方草地生物量动态及其与气候因子的关系[J]. 中国科学: 生命科学, 2010, 40(7): 632–641
Ma W H, Fang J Y, Yang Y H, et al. Biomass carbon stocks and their changes in northern China's grasslands during 1982–2006[J]. Science China: Life Sciences, 2010, 40(7): 632–641

[46] 色音巴图, 贾峰. 中国北方草地生物量时空分异的定位监测研究[J]. 中国草地, 2003, 25(5): 9–14
Seying B T, Jia F. The position monitoring of temporal and spatial dynamics of grassland biomass in northern China[J]. Grassland of China, 2003, 25(5): 9–14

[47] 陈健, 倪绍祥, 李静静, 等. 植被叶面积指数遥感反演的尺度效应及空间变异性[J]. 生态学报, 2006, 26(5): 1502–1508
Chen J, Ni S X, Li J J, et al. Scaling effect and spatial variability in retrieval of vegetation LAI from remotely sensed data[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(5): 1502–1508

[48] Boudreau J, Nelson R F, Margolis H A, et al. Regional aboveground forest biomass using airborne and spaceborne lidar in Québec[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(10): 3876–3890